

직렬-직렬 무선 전력 전송 시스템의 최적 튜닝 기법 연구

최은서, 이상민, 이승환
서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

Optimal Tuning of Series-Series Tuned Wireless Power Transfer System

Eunseo Choi, Sangmin Lee, Seung-Hwan Lee
School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

본 논문에서는 직렬-직렬 무선 전력 전송 시스템을 위한 최적의 공진 튜닝 기법을 제안한다. 공진 튜닝에 따른 코일 간의 효율과 인버터의 영전압 스위칭 및 무부하 시 전압 이득과 같은 분석모델들을 정의하며, 그 후 높은 시스템 효율, 좋은 전력 등급 등을 만족하는, “실현 가능한 설계 공간”을 결정한다. 설계 공간에서 튜닝 주파수를 선정한다면 앞서 나열한 튜닝 요건들을 보장할 수 있다. 이를 통해 직렬-직렬 무선 전력 전송 시스템의 최적 튜닝 기법을 정립한다.

1. 서 론

무선 전력 전송 시스템은 급집전 측 코일 간의 자기적 결합을 통해 큰 공극에서도 전력을 전송할 수 있지만, 큰 공극으로 인한 큰 누설 인덕턴스로 인하여 시스템의 전력 용량과 효율을 향상시키기 위해서는 공진 보상이 필요하다. 유도성 무선 전력 전송 시스템에서는 직렬-직렬, 직렬-병렬, 병렬-직렬 및 병렬-병렬의 네 가지 기본 공진 보상 토폴로지가 있으며, 서로 다른 토폴로지는 입력 임피던스, 영전압 스위칭 범위, 전압 및 전류 이득, 효율, 부하 의존성 등의 다양한 특성을 가진다.^{[1]-[3]} 하지만 각각의 공진 보상 토폴로지는 급집전 측 코일을 공진 튜닝하는 방법만으로도 전혀 다른 전달 특성을 가질 수 있다.^{[4],[5]} 본 논문에서는 직렬-직렬 무선 전력 전송 시스템을 위한 새로운 최적 공진 튜닝 기법을 제안한다.

2. 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 공진 튜닝 지정 설계

2.1 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 구조

그림 1 은 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로이다. V_{dc} 는 입력 전압, R_{out} 은 배터리 등가저항, R_L 은 정류기 등가저항을 의미한다. V_{tx}, I_{tx} 및 V_{rx}, I_{rx} 는 각각 급집전 측 전압 전류를 의미한다. L_{tx}, L_{rx} 는 급집전 측 코일의 자기 인덕턴스, R_{tx}, R_{rx} 는 각 코일의 권선 저항, C_{tx}, C_{rx} 는 급집전 측의 직렬 공진 튜닝 커패시턴스를 의미한다. 이때 동작 각주파수 ω_0 가 일정하다고 가정한다면, 동작 각주파수에 대한 급집전 측 튜닝 각주파수의 비를 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 C_{tx}, C_{rx} 를 (2)와 같이 재정의할 수 있다.

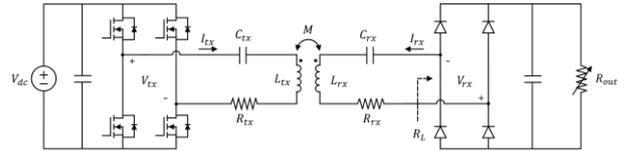


그림 1 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로

$$\alpha_{tx} = \frac{\omega_{tx}}{\omega_0}, \quad \alpha_{rx} = \frac{\omega_{rx}}{\omega_0} \quad (1)$$

$$C_{tx} = \frac{1}{L_{tx}(\alpha_{tx}\omega_0)^2}, \quad C_{rx} = \frac{1}{L_{rx}(\alpha_{rx}\omega_0)^2} \quad (2)$$

2.2 튜닝 요건의 분석모델

본 논문에서는 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 최적 튜닝을 위하여, 다음의 세 튜닝 요건을 선정하고, 분석모델을 정의한다: 1) 코일 간 효율, 2) 인버터의 영전압 스위칭, 3) 무부하 전압 이득.

시스템의 효율은 공진 튜닝의 성능을 평가하는 주요 지표이다. 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 코일 간 효율은 (3)과 같이 정의할 수 있다.

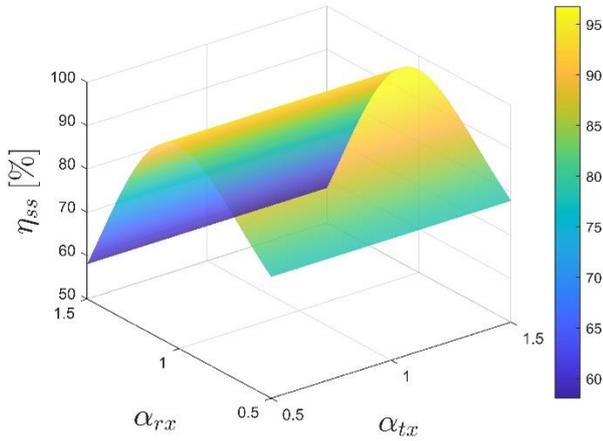
$$\eta_{ss} = \frac{R_L(\omega_0 M)^2}{R_{tx}((R_{rx} + R_L)^2 + (\omega_0 L_{rx} B)^2) + (R_{rx} + R_L)(\omega_0 M)^2} \quad (3)$$

$$\text{where } B = 1 - \alpha_{rx}^2$$

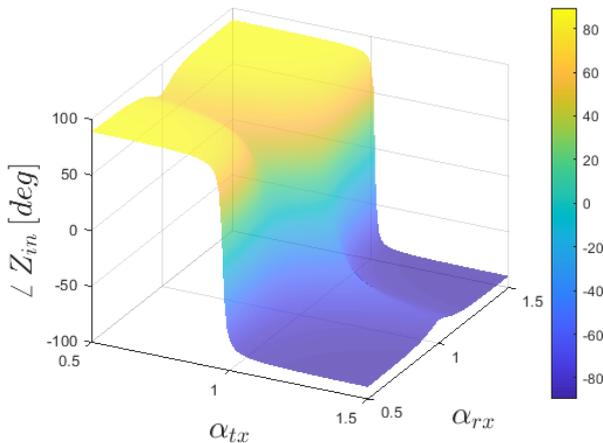
또한 무선 전력 전송 시스템의 높은 효율을 위해 인버터의 영전압 스위칭 또한 중요하다. 이를 위하여 무선 전력 전송 시스템의 인버터 측에서 관찰되는 입력 임피던스의 위상($\angle Z_{in}$)이 정격 출력 전력에서 양수가 되어야 한다. 하지만 시스템의 역률을 위하여 $\angle Z_{in}$ 의 크기가 제한되어야 한다. 정격 출력에서의 $\angle Z_{in}$ 은 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\angle Z_{in} = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_0 L_{tx} A ((R_{rx} + R_L)^2 + (\omega_0 L_{rx} B)^2) - \omega_0 L_{rx} B (\omega_0 M)^2}{R_{tx} ((R_{rx} + R_L)^2 + (\omega_0 L_{rx} B)^2) + (R_{rx} + R_L)(\omega_0 M)^2} \right) \quad (4)$$

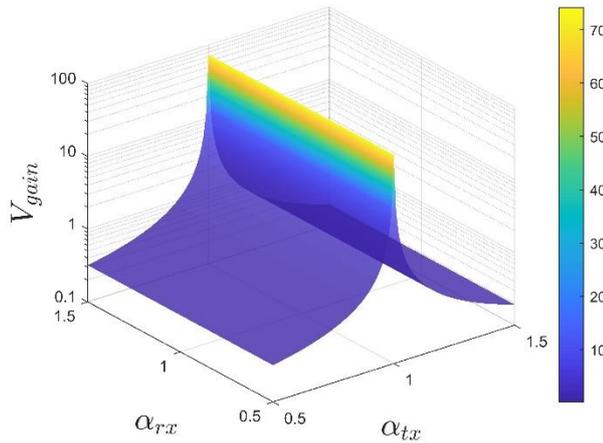
$$\text{where } A = 1 - \alpha_{tx}^2$$



(a)



(b)



(c)

그림 2 목표하는 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템에서 (a) 코일 간 효율, (b) 입력 임피던스 위상, (c) 무부하 전압 이득의 α_{tx}, α_{rx} 에 따른 의존도

직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템에서 급전 측 튜닝 주파수가 동작 주파수와 완벽히 일치할 때 무부하 전압 이득이 매우 높다는 것은 잘 알려져 있다. 따라서 급전 측 튜닝 주파수 선정을 위해서는 무부하 전압 이득을 고려해야 한다. 무부하 전압 이득은 (5)와 같이 정의할 수 있다.

표 1 목표하는 직렬-직렬 무선 전력 전송 시스템 파라미터

동작 주파수(f_o)	85 kHz	정격 전력	11.1 kVA
커플링 계수(k)	0.2	V_{dc}	210 V
L_{tx}	32.7 μH	L_{rx}	46.29 μH
R_{tx}	56.45 m Ω	R_{rx}	83.75 m Ω
정격 부하(R_{load})	5.5 Ω		

$$V_{gain(R_L \rightarrow \infty)} = \sqrt{\frac{(\omega_o M R_{tx})^2}{R_{tx}^4 + (\omega_o L_{tx} R_{tx} A)^2}} \quad (5)$$

그림 2는 목표하는 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템에서 α_{tx}, α_{rx} 의 변화에 따른 세 튜닝 요건을 나타낸다. 표 1은 목표하는 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템에 사용된 파라미터들을 나타낸다.

2.3 제안하는 최적 튜닝 지점

그림 2의 세 튜닝 요건에 대한 목표 범위를 제한하여 한 그래프에 나타낸다면, 세 그래프의 중첩되는 영역을 구할 수 있다. 이는 실현 가능한 설계 공간을 의미한다. 실현 가능한 설계 공간 내에서 α_{tx} 및 α_{rx} 를 선정한다면, 해당 시스템에서 코일 간 효율, 인버터의 영전압 스위칭 및 무부하 전압 이득에 대한 목표 범위 내에서의 성능을 보장할 수 있다.

본 논문에서는 코일 간 효율의 목표 범위를 최대 효율로부터 1% 이내로 선정하였으며, 입력 임피던스 위상의 목표 범위를 $1^\circ - 11^\circ$, 무부하 전압 이득의 목표 범위를 2배 이내로 선정하였다. 이를 통해 도출된 실현 가능한 설계 공간 내에서 α_{tx}, α_{rx} 를 각각 0.937, 0.952로 선택한다면, 해당 시스템은 96.38%의 코일 간 효율, 10.3° 의 입력 임피던스 위상 및 1.96배의 무부하 전압 이득을 달성할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템의 새로운 최적 공진 튜닝 기법을 제안하였다. 제안한 공진 튜닝 기법은 공진 튜닝에 따른 코일 간의 효율과 인버터의 영전압 스위칭 및 무부하 전압 이득을 고려했으며, 이 기법을 통해 설계된 직렬-직렬 공진형 무선 전력 전송 시스템은 코일 간 효율 96.38%, 입력 임피던스 위상 10.3° 및 무부하 전압 이득 1.96배를 달성하였다.

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 “차세대시스템반도체설계전문인력양성사업”으로 지원받아 수행된 연구 결과임(P0017011, 차세대 시스템반도체 설계 전문인력양성사업)

참고 문헌

- [1] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, “Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, 2017, doi:

10.1109/TTE.2017.2780627.

- [2] V. Shevchenko, O. Husev, R. Strzelecki, B. Pakhaliuk, N. Poliakov, and N. Strzelecka, "Compensation topologies in IPT systems: Standards, requirements, classification, analysis, comparison and application," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937891.
- [3] X. Qu, H. Han, S. C. Wong, C. K. Tse, and W. Chen, "Hybrid IPT Topologies with Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 11, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2396471.
- [4] C. Sen Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, 2005. doi: 10.1109/TIE.2005.855672.
- [5] S. Valtchev, B. Borges, K. Brandisky, and J. Ben Klaassens, "Resonant contactless energy transfer with improved efficiency," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 24, no. 3, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2003188.